Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 17, No. 4, Oct- Nov 2021, p. 473-483

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۷، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۰، ص. ۴۸۳-۴۷۳

مقاله پژوهشی

جدایش ناخالصی‌ها از دانه‌های خاکشیر به روش الکترواستاتیکی در بستر سیال (تریبوایروالکترواستاتیک)

مجتبی افشاری‌پور[1]- هادی صمیمی اخیجهانی[2]*- کاظم جعفری نعیمی[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی عملکرد دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک برای خالص‌سازی خاکشیر از ناخالصی‌های موجود در محصول جمع‌آوری شده از مزرعه است. دستگاه شامل دو بخش می‌باشد، محصولات در مرحله اول در واحد تریبوشارژ باردار شده و پس از سقوط آزاد در واحد جداساز الکترواستاتیک جدا می‌شوند. آزمایش با سه فاکتور ولتاژ اعمالی به الکترودها در سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلو ولت، فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ در سه سطح ۹، ۱۵ و ۲۱ سانتی‌متر و زاویه الکترودهای واحد جداساز در سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه صورت گرفت. خلوص محصولات به‌دست آمده در چهار جعبه با استفاده از کدنویسی در M-File محیط MATLAB6.5 و به کمک ابزار پردازش تصویر، تعیین گردید. میانگین خلوص خاکشیر موجود در جعبه شماره ۱ بسیار بالا، ۹۸٪ وزنی به‌دست آمد. برای تعیین مقدار بهینه ولتاژ، فاصله الکترودها و زاویه بر روی وزن چهار جعبه یک مدل ریاضی درجه ۲ پیشنهاد شد. همچنین معادلات رگرسیونی و نمودارهای سه بعدی برهمکنش فاکتورهای مورد بحث برای هر جعبه در نرم‌افزار STAT GR 1.1 تعیین و رسم شدند. مقادیر ضریب تبیین R^2 برای جعبه‌های ۱ تا ۴ جعبه جمع‌آوری مواد به‌ترتیب ۰/۹۰، ۰/۸۹، ۰/۷۵ و ۰/۸۷ بود که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصویر، تریبوایروالکترواستاتیک، خالص‌سازی، ضریب تبیین، ولتاژ بالا.

مقدمه

وجود ناخالصی‌های گوناگون از قبیل: مواد زاید، بذر علف‌های هرز، ساقه، برگ، بذرهای آسیب‌دیده و ناقص و بذرهای کوچک در ریزدانه‌های گیاهی (بذرها و دانه‌های ریز) مشکلاتی را در زمان انبارکردن، انتقال، ذخیره‌سازی، فروش و مصرف ایجاد می‌کند. با جدا کردن بذر علف‌های هرز، از انتشار آن‌ها در مزرعه جلوگیری می‌شود. پاک‌سازی دانه مشکلاتی را که در زمان انبار کردن، انتقال، ذخیره‌سازی، خرید، فروش و مصرف رخ می‌دهد، کاهش خواهد داد (Wang *et al.*, 1994). جداسازی یکی از بخش‌های مهم در مجموعه بوجاری و فرآوری دانه‌های گیاهی و بذر برای دستیابی به کیفیت بالای محصولات و ارقام بذرهای اصلاح‌شده محسوب می‌شود. از آن‌جایی‌که جداسازی ناخالصی‌ها به روش‌های مکانیکی دشوار است، اتخاذ یک روش که بتواند با صرف انرژی کم، راندمان جداسازی بالایی داشته باشد و بذرها (بدون هیچ گونه ناخالصی و علف هرز) و محصولاتی با خلوص بالا تولید کرد، از اهمیت بالایی برخوردار است (Delouche, Vaughan and 1967). یکی از محصولاتی که جداسازی آن از ناخالصی‌هایش دشوار می‌باشد و با روش‌های معمولی نمی‌توان محصول با خلوص بالا تولید کرد، خاکشیر می‌باشد. خاکشیر با نام علمی *Descurainia sophia*، از خانواده چلیپائیان(شب بو) بوده و به صورت خودرو در اماکن غیرزراعی و نسبتاً مرطوب می‌روید. دانه خاکشیر، ریز و به رنگ زرد تیره یا قهوه‌ای روشن است و سطحی ناصاف به شکل بیضی کشیده دارد، یک رأس آن بریده و دارای حلقه‌ای قهوه‌ای رنگ و شفاف است (Bekhradi, 2004; Haji Sharifi, 2003). انواع مختلفی از ماشین‌های جداکننده بذر موجود است که یکی از آن‌ها روش الکتروستاتیکی می‌باشد (Vaughan and Delouche., 1967). جدایش الکترواستاتیکی روشی موثر در جداسازی مخلوط موادی است که از نظر ابعاد و جرم مشابه هم می‌باشند اما از نظر هدایت الکتریکی متفاوت هستند. (Ralston., 1961; Bendimerad *et al.*, 2013). جداسازی الکترواستاتیکی بر اساس جذب یا دفع متفاوت ذرات باردار در

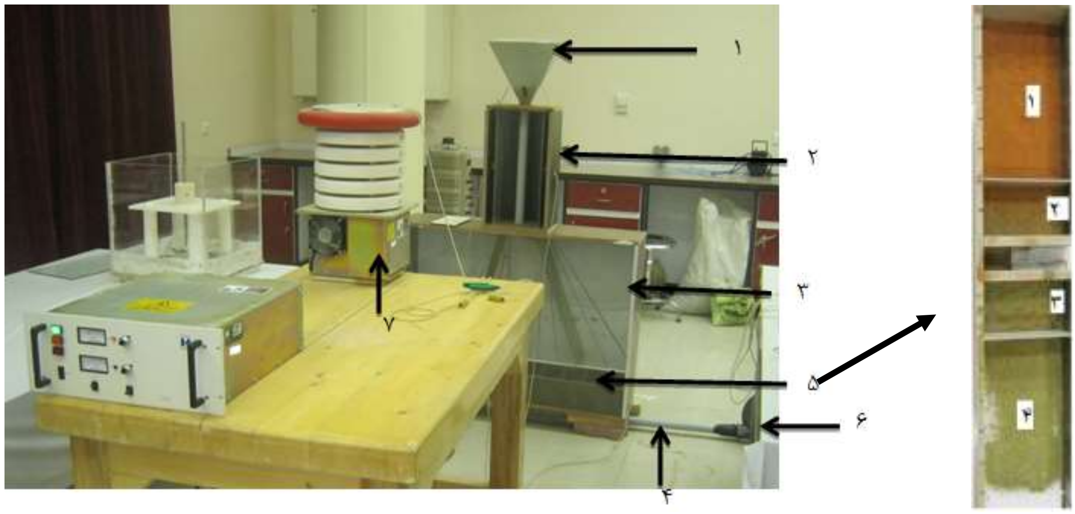
۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان.
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان
(*-نویسنده مسئول: Email: h.samimi@uok.ac.ir)
DOI: 10.22067/ifstrj.v17i4.79575

یک میدان الکتریکی بسیار قوی عمل می‌کند. به همین علت جداسازی الکترواستاتیکی را جداسازی تنش بالا نیز می‌نامند (Ralston, 1961). Lundahl (۲۰۰۱) یک جداکننده الکترواستاتیکی به‌منظور جداسازی کاه از دانه غلات ساخت که دارای یک تسمه عایق بود و مخلوط دانه و کاه از کنار یک الکترود یونیزه کننده عبور داده می‌شد. دانه‌ها به علت چگالی بالاتر، بیشتر تحت تاثیر نیروی وزن و ذرات کاه بیشتر تحت تاثیر نیروی میدان الکترواستاتیکی قرار می‌گرفتند. در نتیجه دانه‌ها تمایل به افتادن روی زمین داشتند و ذرات کاه جذب استوانه می‌شدند. با چرخش استوانه ذرات کاه توسط یک برس کنار زده و از استوانه جدا می‌شدند. در یک روش دیگر محققان با ساخت یک دستگاه جداساز الکترواستاتیکی، به تفکیک و بازیافت مخلوط مواد پلاستیکی پرداختند (Dodobia *et al.*, 2008). Kawamoto و Umezu (۲۰۰۸) از مکانیزمی برای تغذیه کاغذ A4 دستگاه پرینتر و کپی استفاده کردند که متشکل از یک الکترود مدور پوشیده شده با لایه عایق، یک استوانه بارده به صورت مایل در تماس با غلتک جداساز برای باردار کردن لایه عایق، یک الکترود متصل به زمین، منبع تغذیه با جریان مستقیم (DC) و بسته کاغذ بود. Tilmatine و Bendimerad (۲۰۰۹) از نیروی الکترواستاتیک برای بازیافت زباله‌های پلاستیک استفاده کردند و با استفاده از دستگاه جداسازی تریبوالکتریک آزمایشگاهی ساخته شده مطالعه تجربی بر روی دانه‌های حاوی ذرات پلی وینیل کلراید (PVC) و پلی‌اتیلن (PE) انجام دادند و تاثیر ولتاژ بالای استفاده شده را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد، این روش را می‌توان برای جداسازی انواع مختلف پلاستیک و حذف ناخالصی استفاده نمود. درجه خلوص به ولتاژ بالا وابسته می‌باشد. در تحقیقی که توسط Aksa و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد، تاثیر ولتاژ اعمالی برای بازیافت پلاستیک‌ها از ضایعات تجهیزات برق و الکترونیک بررسی شد، آنها به این نتیجه رسیدند، با افزایش ولتاژ اعمالی به الکترودها جرم و خلوص پلی‌کربنات (PC) افزایش و جرم و خلوص پلی آمید (PA) کاهش می‌یابد. در تحقیقی از یک سیستم شامل یک نوار نایلونی و یک پارچه ابریشمی جهت باردار شدن استفاده شد. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که با افزایش زمان جداسازی، کاهش فاصله نوار و افزایش سرعت نوار انتقال از ۵۰ تا ۶۰ دور بر دقیقه میزان جدایش کلاله زعفران از ناخالصی‌ها تا ۹۷ درصد افزایش یافت (Mortezapour *et al.*, 2015). در مطالعه دیگر محققان از دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک برای جداسازی آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) از دانه‌های زباله‌های الکتریکی و تجهیزات الکترونیک استفاده کردند. در این مقاله به بررسی درصدهای مختلف مواد، تغییر در سرعت دمنده و ولتاژ مختلف بین ۱۶ تا ۳۶ کیلو ولت در جدایش به روش تریبوالکترواستاتیک پرداختند و این نتیجه حاصل گردید که تمامی پارامترهای فوق در امر جداسازی مهم و تاثیر گذار هستند، به‌طوری که با افزایش سرعت دمنده و ولتاژ اعمالی درصد خلوص مواد جدا شده بیشتر می‌شود (Dascalescu *et al.*, 2009). Aman و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی موقعیت و مکان الکترود ولتاژ بالا به‌عنوان یک عامل موثر در جداسازی الکترو استاتیکی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد با کاهش فاصله الکترود متصل به ولتاژ بالا جدایش مواد با خلوص بالاتری صورت می‌پذیرد. Brosnan و Sun در مقاله خود خلاصه‌ای از تحقیقات انتشار یافته بین سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۳ در خصوص بررسی کیفیت محصولات کشاورزی و غذایی با روش‌های پردازش تصویر ارائه دادند. Liming و Yanchao (۲۰۱۰) پردازش تصویر را برای درجه‌بندی توت‌فرنگی بر اساس رنگ، شکل و اندازه به‌کار بردند. آنها با به‌کارگیری سیستمی شامل یک نوار نقاله و دو عدد سنسور و همچنین دوربینی که بر روی سیستم نصب بود، پس از تبدیل تصاویر گرفته شده به فضای رنگی و استفاده از تابع K_maens توانستند به این مهم دست یابند. فتاحی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تکنیک پردازش تصویر میزان بادبردگی قطرات سم خارج شده از نازل‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. تحقیقات بسیار کمی در مورد جدایش محصولات دانه‌ای ریز کشاورزی با استفاده از روش تریبوایروالکترواستاتیک و اندازه‌گیری میزان خلوص آن با استفاده از روش پراش لیزری و تحلیل رگرسیونی پارامترهای موثر بر جدایش محصول انجام شده است. جداسازی کامل دانه‌های خاکشیر به دلیل این که شکل‌هایی شبیه هم دارند به روش مکانیکی غیرممکن بوده و احتمال وارد شدن آسیب‌های فیزیکی توسط سیستم‌های مکانیکی وجود داشته و ظرفیت بسیار پایینی دارند. در این راستا، استفاده از روش‌های الکتروایرواستاتیک برای جداسازی این محصول می‌تواند موانع زیادی در فرآوری این محصول و ارائه آن در بازار از پیش پای کشاورز و تولید کننده بردارد. هدف از انجام این تحقیق بررسی دستگاه تریبوالکترواستاتیک جداکننده خاکشیر از نظر توانایی در جداسازی و تحلیل توزیع اندازه دانه‌های خاکشیر جداشده توسط دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک

جداکننده تریبوایروالکترواستاتیک ساخته شده شامل: قیف یا مخزن تغذیه مواد، واحد باردارکننده مواد، واحد جداکننده، دمنده با لوله‌های انتقال هوا، واحد جمع‌آوری و منبع تغذیه متصل به الکترودها می‌باشد (شکل۱).



شکل۱- طرح واره‌ای از اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه ۱) قیف یا مخزن تغذیه ۲) واحد باردارکننده مواد ۳) واحد جداکننده ٤) لوله انتقال هوا ٥) واحد جمع‌آوری مواد ٦) دمنده ۷) منبع تغذیه کننده ولتاژ بالا.

قیف تغذیه‌کننده از جنس آهن گالوانیزه با مقطع مربعی با ابعاد ۳۰۰ ×۳۰۰ میلی‌متر و ارتفاع مخزن ۳۰۰ میلی‌متر است. دهانه خروجی به شکل مربعی به ابعاد ۷×۷ میلی‌متر می‌باشد. واحد تریبوشارژ شامل محفظه‌ای به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۲۰۰×۳۵۰× ۵۱۰ میلی‌متر که در دو وجه بالا و پایین آن چند شیار برای تغییر مکان الکترودها تعبیه شده است. این الکترودها از جنس آلومینیوم و با ابعاد ۱۵۰×۵۰۰ میلی‌متر می‌باشند. هدایت الکتریکی مطلوب آلومینیوم و خواص هدایت الکتریکی حجمی بهتر در مقایسه با فلزات دیگر و به خصوص مس، دلیل اصلی استفاده از آن در مصارف الکتریکی است (Kaufman., 2000). یک الکترود به‌وسیله کابل ۴ میلی‌متری که از سوراخ‌های تعبیه شده در دو وجه چپ و راست عبور می‌کند. بر روی کلاهک HV Stack (قطب مثبت) و الکترود دیگر به قطب منفی منبع تغذیه متصل شده است. یک لوله پلی‌اتیلن به ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و قطر ۴۰ میلی‌متر برای عبور مواد و تریبوشارژ آن‌ها، از مرکز این قسمت می‌گذرد . قسمت تحتانی دستگاه شامل محفظه‌ای به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۲۶۰×۲۱۰۰×۷۸۰ میلی‌متر می‌باشد و دیواره جلوی آن به‌منظور مشاهده فرآیند جداسازی از جنس شیشه انتخاب شد. دو الکترود آلومنیومی با ابعاد ۱۵۰×۶۰۰ میلی‌متر نیز با لولا به وجه بالا متصل گردیده‌اند تا بتوانند زوایای مختلف به‌خود بگیرند، در صفحه پشتی آن خطهایی با زوایای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه به‌منظور مشاهده و تعیین زوایای این الکترودها رسم شده است. اتصال این الکترودها به منبع تغذیه ولتاژ بالا نیز مشابه واحد تریبو شارژ می‌باشد. میدان الکتریکی با اعمال ولتاژ بر روی الکترودهای موجود در دستگاه ایجاد می‌گردد. شدت میدان الکتریکی با توجه به تغییر ولتاژ توسط منبع تغذیه مدل OL 8000/104 تغییر می‌کند. از یک دمنده نیز برای معلق‌سازی مواد استفاده می‌گردد. در انتهای دستگاه نیز جعبه‌ای برای جمع‌آوری دانه‌های جداسازی شده و مواد ناخالص تعبیه شد.

روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها با خاکشیر (رقم سیسمبریم) جمع‌آوری شده از مزارع شهر ماهان در استان کرمان انجام گرفت. پس از جداکردن شاخ و برگ و غشای روی این دانه‌ها، از الک با مش ۱۶ عبور داده شدند. با انجام این عمل دانه‌های خاکشیر از برگ و ناخالصی‌های با اندازه بزرگ‌تر از ۱/۲ میلی‌متر شامل شن‌ریزه، شاخه، برگ و غشای روی دانه‌ها جدا می‌شوند. برای جدا کردن ناخالصی‌های باقی مانده به کمک دستگاه ساخته شده، نخست مواد اولیه با ترازوی آزمایشگاهی (کیا ۶۲۰۰، AHK) با دقت ۰/۱ گرم به نمونه‌های یک کیلوگرمی تقسیم شد. برای جلوگیری از تاثیر عوامل محیطی بر نمونه‌ها آنها را در بسته‌های پلاستیکی، به دور از رطوبت و نور در دمای اتاق نگهداری می‌شدند. تمام آزمایش‌ها در دستگاه خالص‌ساز خاکشیر ساخته شده در کارگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام گرفت. در تمامی آزمایش‌ها سرعت دمنده هوا (۱۳۰۰۰ دور بر دقیقه)، نرخ تغذیه (۳/۱ گرم بر ثانیه) و رطوبت نسبی هوا ثابت (RH=۲۱±٪۲)، دمای هوای اتاق ۱±۲۳ درجه سلسیوس بود. برای به‌دست آوردن رطوبت محصول به مقدار ۱۰ گرم در سه تکرار در آون در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد (AOAC, 1984) رطوبت بر پایه خشک آن ۴/۵ درصد به‌دست آمد. نمونه‌ها از طریق قیف تغذیه درون دستگاه شارژ گردیدند. در قسمت بالایی دستگاه ضمن

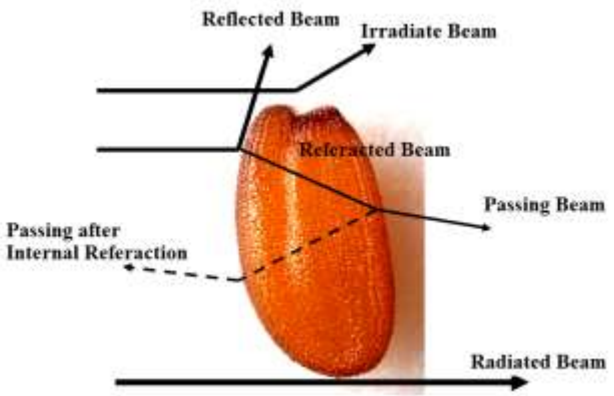
سقوط از درون لوله PVC از میان دو الکترود متصل به منبع ولتاژ بالا باردار شده (تریبوالکتریک و بمباران یونی) سپس در طبقه پایین خاکشیر تحت ترکیبی از نیروهای گرانش و نیروی الکترواستاتیک از ناخالصی جدا می‌شد. آنالیز خلوص مواد جداشده در جعبه شماره ۱ تا ۴ (شکل ۱) با توجه به این‌که دانه‌ها و ناخالصی‌ها رنگ‌های مختلفی داشتند با استفاده از برنامه پردازش تصویر در MATLAB 6.5 صورت گرفت. برای این کار نمونه‌های ۳ گرمی از محصول جدا شده بر روی یک سطح سفید ریخته شده (طوری که روی هم قرار نگیرند) و تصویربرداری از آن صورت گرفت. میزان خلوص به‌دست آمده از این روش و روش وزنی با هم مقایسه شده و درصد بر این اساس برای آزمایش‌های دیگر با استفاده از روش پردازش تصویر می‌آمد. آنالیز عکس‌های مواد دانه‌ای جمع‌آوری شده در یکی از تقسیم‌های چهارگانه (شکل۱) انجام شد. در این برنامه از تابع (k-means) استفاده شد. محاسبه عددی و برآورد شماره پیکسل‌ها مطابق هر رنگ انجام شد به‌طوری که نرخ بین عدد دانه‌های خاکشیر و ناخالصی‌ها تعیین شد. جرم مواد جداشده در هر کدام از ۴ قسمت جعبه جمع‌آوری توسط ترازوی آزمایشگاهی و با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. آزمایش با سه فاکتور ولتاژ اعمالی به الکترودها در سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوولت، فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ در سه سطح ۹، ۱۵ و ۲۱ سانتی‌متر و زاویه الکترودهای واحد جداساز در سه سطح ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه صورت گرفت. سطوح اشاره شده بر اساس مقادیر تاثیرگذاری بر روی جدایش تعیین شدند. بیش از صد آزمایش اولیه برای تعیین این سطوح انجام گرفت و نتایج اولیه نشان داد در سطوح کمتر از مقادیر تعیین شده و بیشتر از آن یا بر روی جدایش تاثیری نداشته و یا باعث ایجاد جرقه بین صفحات می‌گردید. برای نمونه برای ولتاژ مقادیر کمتر از ۲۰ کیلو ولت، برای فاصله بیشتر از ۲۱ سانتی‌متر و برای درجه بیشتر از ۴۰ درجه، جدایش دانه های خاکشیر یا به سختی و یا اصلا جدایش صورت نمی‌گرفت. همین روند در سطوح انتخاب شده در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شد (Kawamoto and Umezu, 2008). داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها با طرح بلوک کاملا تصادفی، به‌وسیله برنامه SAS9.1.3 و MSTATC تجزیه و تحلیل گردیدند. برای مقایسه میانگین وزن مواد جعبه‌ها نیز از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده گردید. معادله رگرسیون چند متغیره غیرخطی برای پارامترهای تاثیرگذار بر وزن مواد جداسازی شده چهار جعبه جمع‌آوری مواد پیشنهاد شد (Eriksson *et al.*, 2000). برای فاکتورهای مطرح شده v ولتاژ، d فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ، b زاویه الکترودهای واحد جداساز و Y وزن مواد در هر جعبه می‌باشند (رابطه ۱). داده‌ها به وسیله استات گراف (STATGR ver.1.1) آنالیز شدند و پاسخ یا واکنش طراحی شده و بهترین تنظیم پارامترها برای فرآیند بهینه تشخیص و رسم می‌شوند. علاوه بر این مقدار ضریب تبیین R^2 برای هر جعبه تعیین شد.

$$Y=a_0+a_1\times v+a_2\times d+a_3\times b+a_4\times v^2+a_5\times d^2+a_6\times b^2+a_7\times v\times d+a_8\times v\times b+a_9\times d\times b \quad (1)$$

اندازه دانه‌های جدا شده، به روش پراش لیزری تعیین شد، و برای این منظور از دستگاه FRITSCH Laser Particle Size Analyser ANALYSETTE 22 NanoTec- که در شکل۲ نشان داده شده است، استفاده گردید. استاندارد به‌کار برده شده در تعیین اندازه ذرات، ASTM. E1617 2009 می‌باشد. همچنین در این شکل چگونگی برخورد به پرتوهای لیزر به دانه خاکشیر و رفتار پرتوها پس از برخورد را نشان می‌دهد.

در ادامه نتایج حاصل از دستگاه پراش لیزری برای جعبه شماره ۱ به صورت نموداری استخراج شده و میزان توزیع شدت پراکندگی برای هر جعبه به وسیله نمودار ارائه و بحث شده است.

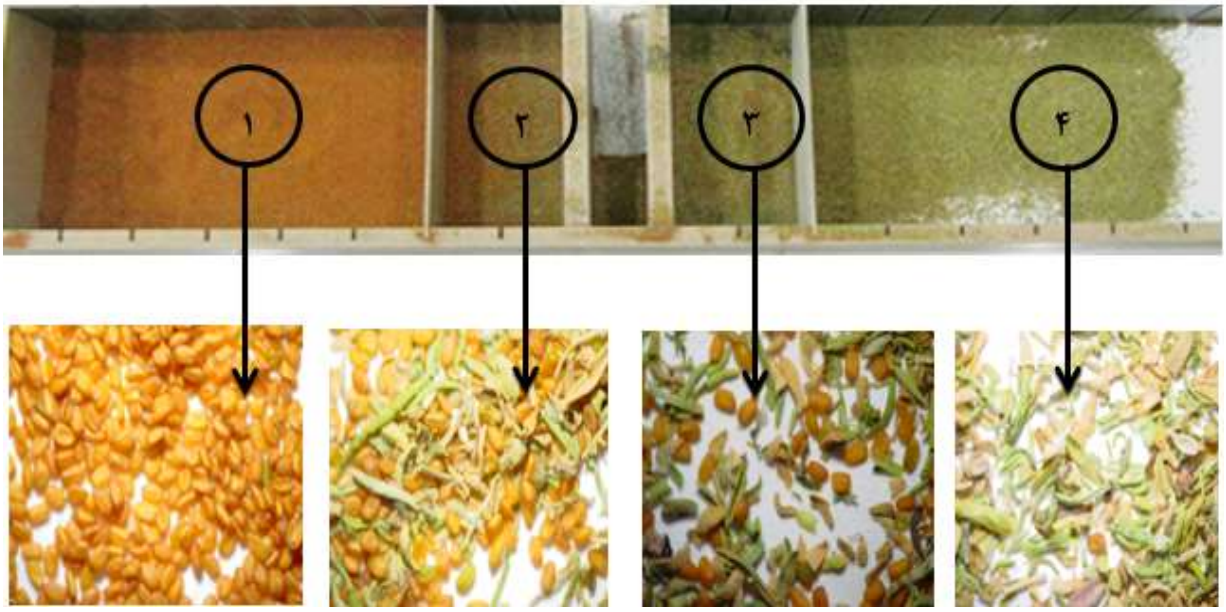




شکل ۲- دستگاه اندازه گیری اندازه ذرات به روش پراش لیزری و چگونگی برخورد پرتوها به دانه خاکشیر

نتایج و بحث

قطبش مواد بسته به موقعیت‌شان در واحد تریبو الکتریک متفاوت می‌باشد. در این پژوهش مشخص گردید، دانه‌های خاکشیر بار منفی به‌خود گرفته و به سمت الکترود مثبت واحد جداساز دستگاه حرکت می‌کنند، سپس تحت نیروی گرانش درون جعبه جمع‌آوری سقوط می‌نمایند. ناخالصی‌های موجود (شامل شن‌ریزه، شاخه، برگ و غشای روی دانه‌ها)، بار مثبت می‌گیرند و به سمت الکترود منفی دستگاه متمایل می‌شوند (Ralstone, 1961 و Wang *et al*., 1994). محفظه انتهایی نزدیک به الکترود مثبت برای محصول خالص و محفظه انتهایی نزدیک به الکترود منفی برای ناخالصی‌ها و دو محفظه میانی برای مخلوط محصول می‌باشد (شکل ۳). برای تعیین درصد خلوص، دانه‌های خاکشیر از ناخالصی‌ها جدا شده و پس از توزین ناخالصی‌ها و دانه‌های خاکشیر، میزان خلوص هر جعبه به‌دست می‌آمد. محاسبات مربوط به خلوص در هر بار تکرار آزمایش نشان داد، میانگین درصد خلوص مواد جعبه شماره ۱ بالای ۹۸٪، جعبه شماره ۲ بین ۶۵٪ تا ۷۵٪، جعبه شماره ۳ بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ و میانگین درصد خلوص مواد جعبه شماره۴ کمتر از ۶٪ است. با توجه به این‌که هدف در ساخت این دستگاه رسیدن به خلوص بالای خاکشیر است، لذا در ادامه به‌طور مفصل‌تر در خصوص جعبه شماره ۱ با حداکثر خلوص و جعبه شماره ۴ با حداکثر ناخالصی نسبت به سایر جعبه‌ها بحث می‌شود.



شکل ۳- تقسیم‌بندی جعبه جمع‌آوری و تصویر مواد در بزرگ‌نمایی ۲۰ برابر ۱) محصول خالص ۲ و ۳) مخلوط دانه‌های خاکشیر و ناخالصی ٤) ناخالصی.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها برای دو جعبه ۱ و ۴ که مهم‌ترین جعبه‌های مورد بحث برای جدایش محصول می‌باشند، در جدول۱ نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس وزن مواد در جعبه شماره۱ به عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی به الکترودها، فاصله دو الکترود واحد تریبوشارژ و زاویه دو الکترود جداساز نشان داد تمامی اثرات ساده، دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشند. اما در مورد جعبه شماره۴، اثرات ساده و سه‌گانه و اثر متقابل فاصله الکترودها در واحد شارژ کننده و زاویه الکترودها در واحد جداساز در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. اثرات متقابل دوگانه به غیر از اثر متقابل اشاره شده معنی‌دار نمی‌باشد.

نتایج مقایسه بین سه ولتاژ با آزمون چنددامنه‌ای دانکن برای جعبه شماره ۱ نشان داد که با افزایش ولتاژ، کاهش فاصله و افزایش درجه میزان وزن خاکشیر با خلوص بالا افزایش می‌یابد. این ولتاژها داری اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می‌باشند (جدول ۲). در مورد جعبه شماره ۴ نیز همان نتایج ملاحظه شد. با این تفاوت که بین ولتاژهای ۳۰ و ۴۰ کیلوولت اختلاف معنی‌دار نمی‌باشد که این نتیجه می‌تواند در کاهش توان استفاده شده برای جدا سازی مواد خاکشیر مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس فاکتورهای موثر بر وزن مواد جعبه شماره ۱ و ٤

شماره جعبه	منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	P> F
جعبه شماره ۱	تکرار	۲	۶۰/۲۵	۱/۶۹ n.s
	ولتاژ	۲	۱۸۰۳۴/۳۷	۵۰۵/۶۰**
	فاصله	۲	۳۶۹۳۱/۵۶	۱۰۳/۳۸** ۵
	زاویه	۲	۶۸۴۷۷/۷۷	۱۹۱/۷۸** ۹
	ولتاژ* فاصله	۴	۴۱۵/۶۲	۱۱/۶۵**
	ولتاژ* زاویه	۴	۳۸۰۵/۱۴	۱۰۶/۶۸**
	فاصله* زاویه	۴	۶۶۴/۰۹	۱۸۶/۸۳**
	ولتاژ* فاصله* زاویه	۸	۳۰۰۸/۴۶	۸۴/۳۶**
جعبه شماره ٤	تکرار	۲	۱۳/۴۸	۱/۳۲ n.s
	ولتاژ	۲	۶۶۸/۴۸	۶۵/۵۴**
	فاصله	۲	۱۴۱۹/۴۴	۱۴۶/۳**
	زاویه	۲	۲۸۱۴/۱۱	۲۷۵/۹۱**
	ولتاژ* فاصله	۴	۱۲/۴۸	۱/۲۲ n.s
	ولتاژ* زاویه	۴	۱۱/۸۱	۱/۱۶ n.s
	فاصله* زاویه	۴	۱۵۲/۲۲	۱۴/۹۲**
	ولتاژ* فاصله* زاویه	۸	۸۰/۰۰	۷/۸۴**

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و n.s نبود اختلاف معنی‌دار.

جدول۲- میانگین وزن مواد موجود در جعبه‌های ۱ و ٤ مربوط به متغیرهای اندازه گیری شده (ولتاژ اعمالی، فاصله الکترود و زاویه الکترود) برای دستگاه تریبوشارژ

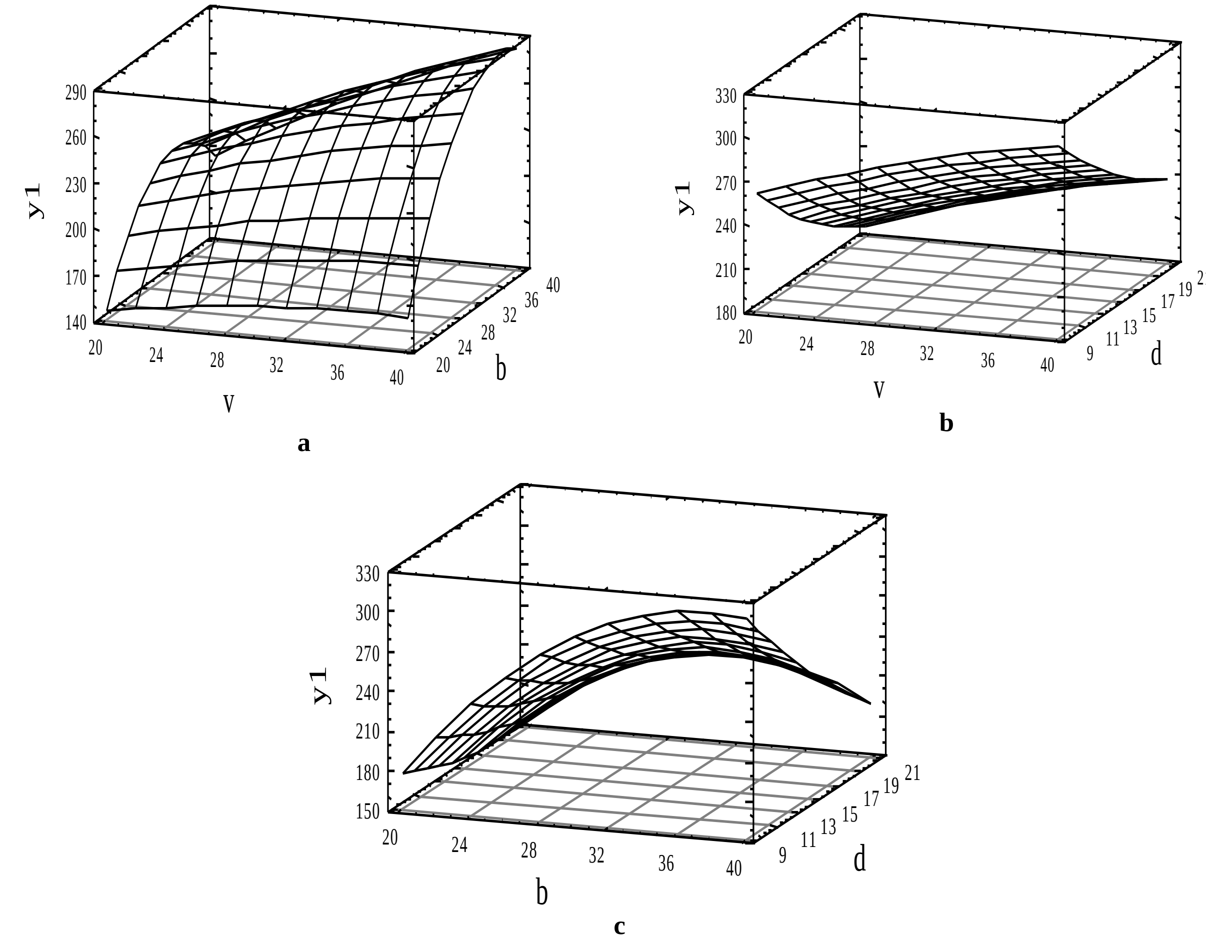
	ولتاژ (kV)			فاصله (cm)			زاویه (درجه)		
میانگین وزن (g)	۲۰	۳۰	٤۰	۹	۱۵	۲۱	۲۰	۳۰	٤۰
جعبه شماره ۱	۱۹۱/۴۱^{c}	۲۲۱/۷۸^{b}	۲۴۲/۸۱^{a}	۲۵۷/۷۹^{a}	۲۱۳/۹۶^{b}	۱۸۴/۲۶^{c}	۱۶۰/۵۲^{b}	۲۴۸/۲۹^{a}	۲۴۷/۱۸^{a}
جعبه شماره ٤	۸۱/۶۷^{b}	۹۰/۰۷^{a}	۹۰/۴۸^{a}	۹۵/۵۶^{a}	۸۵/۶۷^{b}	۸۱/۰۰^{c}	۷۶/۷۰^{c}	۸۸/۴۸^{b}	۹۷/۰۴^{a}

معادله رگرسیون چند متغیره غیرخطی برای پارامترهای تاثیرگذار بر وزن مواد جعبه شماره۱ به‌دست آمد (رابطه ۱). برای این کار مقادیر میانگین آزمون چند دامنه‌ای دانکن به‌دست آمده در جدول‌هایی تنظیم شده و سپس اثرات متقابل به‌صورت نمودار ترسیم شده و معادله مورد نظر بر روی آن برازش می‌شود. مقدار ضریب تبیین R^2 برای وزن جعبه شماره ۱ برابر۹۰ درصد بود و این مقدار نشان می‌دهد، پارامترهای مورد بررسی ۹۰ درصد از وزن جعبه شماره۱ را برازش می‌کنند. مطابق معادله۱ وزن جعبه شماره۱ به‌صورت معادله درجه دو با سه پارامتر بیان شده ارتباط دارد و با توجه به مثبت بودن ضرایب b و vb و منفی بودن ضریب db در این معادله موید این مطلب است که با افزایش ولتاژ اعمالی به الکترودها، افزایش زاویه الکترودهای واحد جداساز و کاهش فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ وزن مواد این جعبه با خلوص بیش از ۹۸ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش ولتاژ اعمالی به الکترودهای هر دو واحد تریبوشارژ و جداساز، مواد اولیه درون میدان الکتریکی قوی‌تری قرار می‌گرفتند. قرارگیری این مواد در میدان الکتریکی قوی‌تر، باعث جذب بیشتر دانه‌ها توسط الکترود منفی بیشتر توسط دانه‌های خاکشیر می‌گردد. این نتیجه‌گیری با نتایج Dascalescu و همکاران (۲۰۰۹) برای جداسازی تریبوایروالکترواستاتیک ABS و ABS-PC از دانه‌های زباله‌های الکتریکی و تجهیزات الکترونیک، Tilmatine و Bendimerad (۲۰۰۹) در زمینه بازیافت تریبوالکترواستاتیک پلاستیک‌ها و Aksa و همکاران (۲۰۱۳) تاثیر ولتاژ اعمالی برای بازیافت پلاستیک‌ها از ضایعات تجهیزات برق و الکترونیک مطابقت

دارد. با کاهش فاصله الکترودها وزن خاکشیر با خلوص بالا در جعبه شماره ۱ به صورت خطی افزایش می‌یابد، چون نیروی وارده به یک جسم در حالت سقوط با فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ رابطه عکس دارد. Aman و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی موقعیت و مکان الکترودها به‌عنوان یک عامل موثر در جداسازی الکترواستاتیکی پرداختند، نتایج آن‌ها با یافته‌های این تحقیق در خصوص اثر فاصله الکترودها بر مقدار جداسازی هم‌سو است. با افزایش زاویه بین الکترودهای واحد جداساز، هدایت خاکشیرهای با بار منفی به سمت الکترود مثبت این واحد باعث می‌گردد، خاکشیرهای باردارشده در طول سقوط به‌طور پیوسته تمایل به جذب به سمت الکترود مثبت را داشته باشند، بنابراین در فاصله بیشتری از مرکز سقوط می‌کنند. این توصیف در رابطه ۲ مشهود است.

$$Y_1 = -۲۸۹/۷۳+۳۱/۸۹b-۰/۰۵v^۲+۰/۲۲d^۲-۰/۴۴b^۲+۰/۱۸vb-۰/۴۳db \qquad (۲)$$

برای تصور کردن اثر متقابل فاکتورها بر روی وزن مواد جدا شده، نمودارهای سه بعدی بر اساس دو متغیر و ثابت نگهداشتن متغیر سوم ارائه شدند. افزایش ولتاژ در کاهش فاصله موجب بالا رفتن سریع وزن مواد در این خانه می‌شود، زیرا هر دو عامل باعث افزایش میدان الکترواستاتیکی می‌شوند (شکل ۴-a). اثر متقابل ولتاژ در زاویه شکل ۴-b نشان می‌دهد، افزایش زاویه در ولتاژهای بالاتر وزن مواد را با شیبی تندتر افزایش می‌دهد. بررسی مقایسه اثر متقابل دو فاکتور فاصله در زاویه نشان داد، هر چه فاصله کمتر شود افزایش زاویه باعث افزایش وزن خاکشیر با خلوص بالا در جعبه شماره ۱ می‌شود (شکل ۴-c).



شکل ٤- وزن خاکشیر در جعبه شماره ۱ بر حسب v ولتاژ (کیلو ولت)، d فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ (سانتی‌متر) و b زاویه الکترودهای واحد جداساز (درجه).

مقدار ضریب تبیین $R^۲$ برای جعبه شماره ۲ برابر ۸۹ درصد به‌دست آمد، همچنین رابطه ۳ نشان می‌دهد، با توجه به منفی بودن ضرایب v و b و مثبت بودن ضریب d، وزن مواد در این جعبه با افزایش ولتاژ و زاویه الکترودهای واحد جداساز کاهش یافته و با افزایش فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ، افزایش می‌یابد (رابطه ۳).

$$Y_۳=۵۵۸/۸۵-۱۰/۹۴v+۵۴/۱۳d-۲۸/۵۸b+۰/۱۵v^۲-۱/۴۴d^۲-۰/۴۱b^۲ \quad (۳)$$

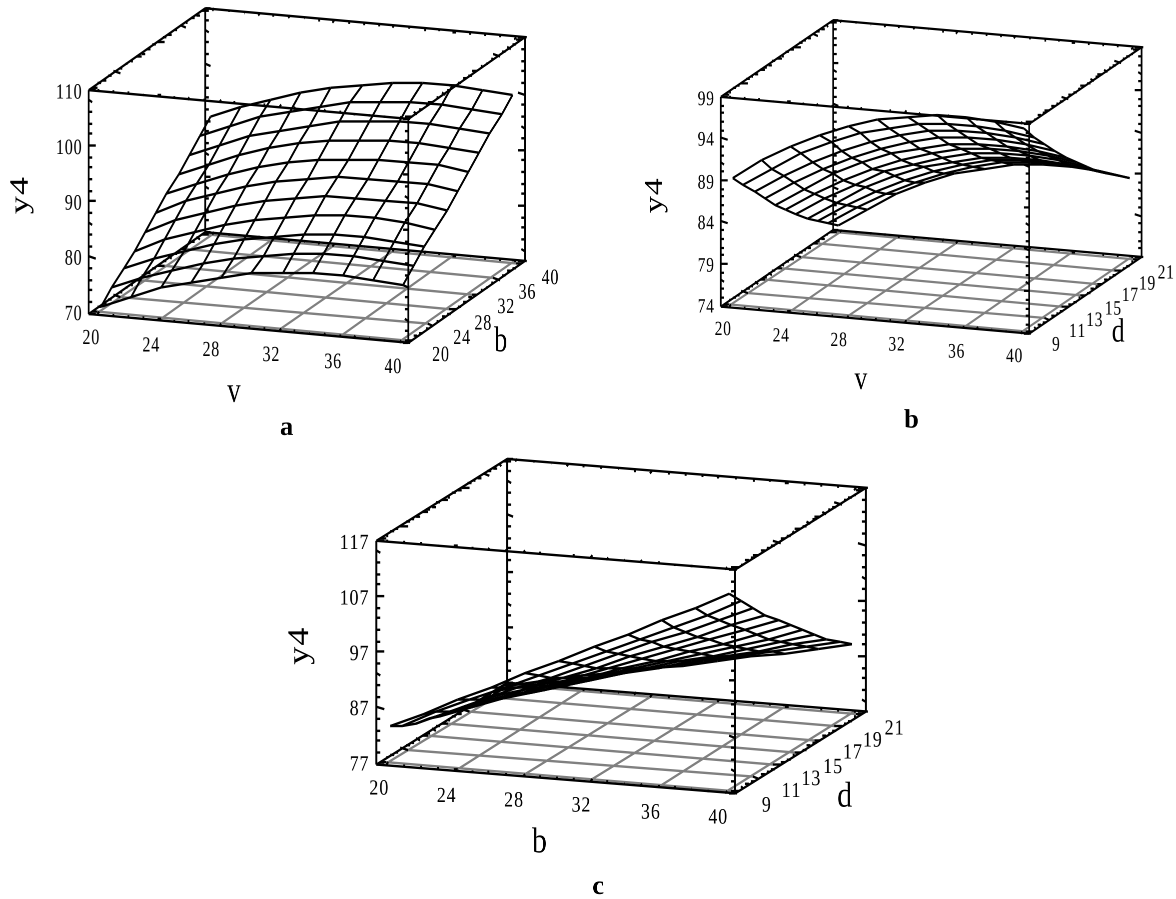
مقدار $R^۲$ در جعبه شماره ۳ برابر ۷۵ درصد به‌دست آمد. مطابق رابطه ۴ وزن جعبه شماره ۳ به صورت معادله درجه دو با سه پارامتر بیان شده ارتباط دارد و نشان می‌دهد، با افزایش ولتاژ، کاهش فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ و کاهش زاویه الکترودهای واحد جداساز وزن مواد در این جعبه افزایش می‌یابد (رابطه ۴).

$$Y_۳=۶۳۷/۸۵+۷/۰۹v-۵۱/۶۶d+۱/۱۷d^۲-۰/۲۷vb+۰/۴۳db \quad (۴)$$

مقدار $R^۲$ در جعبه شماره ۴ مساوی با ۸۷ درصد شد و با توجه به مثبت بودن ضرایب v و b در رابطه ۵ مشخص است، وزن این جعبه با افزایش ولتاژ اعمالی به الکترودهای واحد تریبو شارژ و زاویه الکترودهای واحد جداکننده افزایش می‌یابد. با توجه به منفی بودن ضریب db چون ضریب b مثبت است در نتیجه با افزایش فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ و کاهش زاویه الکترودهای واحد جداساز وزن مواد در این جعبه کاهش می‌یابد این نتیجه‌گیری با نتایج Dascalescu و همکاران (۲۰۰۹)، Aksa و همکاران (۲۰۱۳) و Tilmatine و Bendimerad (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

$$Y_۴=۲/۹۲+۲/۸۴v+۲/۰۶b-۰/۰۴v^۲+۰/۰۳d^۲-۰/۰۷db \quad (۵)$$

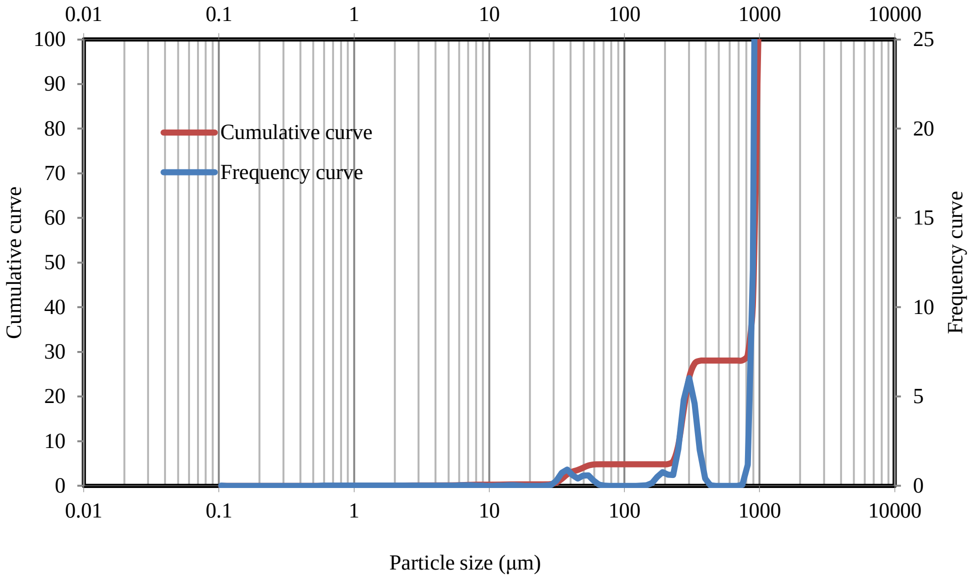
در ولتاژهای بالاتر با کاهش فاصله وزن ناخالصی‌های موجود در این خانه افزایش می یابد (شکل ۵-a). در تاثیر هم‌افزایی ولتاژ در زاویه همان‌گونه که در شکل ۵-b مشاهده می‌شود افزایش وزن مواد قابل توجه می‌باشد. همچنین در زوایای بالاتر با کاهش فاصله وزن مواد افزایش پیدا می‌کند (شکل ۵-c).



شکل ۵- وزن مواد جعبه شماره ٤ بر حسب v ولتاژ (کیلو ولت)، d فاصله الکترودهای واحد تریبوشارژ (سانتی‌متر) و b زاویه الکترودهای واحد جداساز (درجه).

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل ذرات جدا شده خاکشیر با استفاده از دستگاه پراش لیزری برای جعبه شماره ۱ که محصول جدا شده با بیشترین خلوص در آن وجود دارد، در شکل ۶ آمده است. این دستگاه اندازه ذرات را از یک صدم میکرومتر تا ۱۰ میلی‌متر را گزارش می‌نماید. برای این کار ذرات جدا شده موجود (فقط شامل خاکشیر خالص) در جعبه شماره ۱ در درون دستگاه پراش لیزری قرار گرفته و چگونگی

توزیع دانه‌ها بر اساس ابعاد در این جعبه به‌دست آمد. نتایج نشان داد اندازه دانه‌های خاکشیر با حرکت به سمت جعبه شماره ۴ کاهش پیدا می‌کرد. به عبارت دیگر جعبه شماره ۱ دارای دانه‌های خاکشیر با ابعاد بزرگ‌تر بودند. در شکل ۶ بر حسب فراوانی نسبی، سه قله (پیک) مشاهده می‌گردد، قله اول مربوط به ذرات بسیار ریز دانه‌های خاکشیر است. قله دوم و سوم نشان‌دهنده اندازه دانه‌های (بیضوی شکل) خاکشیر می‌باشد. در این جعبه ذرات با اندازه کمتر از ۰/۴۴۶ میکرومتر وجود ندارد، ۴/۸۹ درصد مواد در این جعبه میانگین اندازه بین صفر تا ۲۱۰ میکرومتر، ۲۳/۱۸ درصد بین ۲۱۰ تا ۶۸۰ میکرومتر و ۷۱/۹۳ درصد اندازه ای بین ۶۸۰ تا ۹۸۰ میکرومتر دارند.



شکل ٦- اندازه ذرات جعبه شماره ۱ بر حسب فراوانی نسبی و تجمعی

با توجه به شکل ۶ محدوده ۹۸۰-۶۸۰ میکرومتر در این جعبه بیشترین میزان را نسبت به جعبه‌های دیگر به خود اختصاص داده است. این امر نشان دهنده آن است که دانه‌های موجود در جعبه ۱ به‌خوبی باردار شده و با توجه به رابطه $F_e = qE = 4\pi r^2 \sigma E$ دانه‌های با ابعاد بزرگتر در هنگام باردار شدن در واحد تریبوشارژ، بار منفی بیشتری گرفته و در نتیجه انحراف این دانه‌ها به سمت الکترود مثبت بیشتر است و در هنگام سقوط در فاصله بیشتری از مرکز جعبه جمع‌آوری مواد سقوط می‌نمایند (جعبه شماره۱). این نتیجه با نتایج بدست آمده از مطالعات محققان دیگر در مورد سبوس گندم (Chen *et al*., 2014)، جدایش مواد غیر استاندارد از مواد دارویی (Naik *et al*., 2016)، جدایش مواد پودر شده فلزی (Trigwell, 2003)، مواد پودری صنعتی (Cross *et al*., 1981) مطابقت دارد. بنابراین می‌توان ادعا نمود که با استفاده از این دستگاه، میزان خلوص خاکشیر تولیدی تا بالای ۹۹/۵ می‌تواند افزایش یابد، هرچند میزان تولید احتمالا کاهش یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌ها در فرآیند جداسازی تریبوایروالکترواستاتیک مخلوط خاکشیر همراه با ناخالصی نشان داد این روش، راه‌حلی مناسب برای جداسازی انواع مختلف خاکشیر با خلوص بالای ۹۸ درصد، راندمان بالا و درجه‌بندی آن‌ها بوده و می‌تواند جایگزین روش‌های معمول جداسازی گردد. همچنین مشخص شد، بیشترین ضریب تبیین به میزان ۹۰ درصد برای جعبه شماره ۱ می‌باشد و با حرکت به سمت جعبه شماره ۴ این ضریب کاهش می‌یابد. میزان ولتاژ اعمال شده به سر الکترودها و زاویه الکترودها تاثیر مستقیم بر میزان خلوص مواد جدا شده داشته است. این در حالی است که اثر فاصله الکترودها معکوس می‌باشد. با استفاده از دستگاه پراش لیزری، تجزیه و تحلیل بر روی ذرات جدا شده خاکشیر به وسیله سامانه تریبوایروالکترواستاتیک که درصد خلوص بالایی داشتند، صورت گرفت. نتایج نشان داد، دانه‌های با ابعاد بزرگتر در فاصله دور از قسمت مرکزی تریبوایروالکترواستاتیک قرار می‌گیرند و با نزدیک شدن به قسمت مرکزی علاوه بر افزایش میزان ناخالصی میزان فراوانی ذرات با ابعاد کوچکتر نیز افزایش می‌یابد. با توجه به دقت جدایش دانه های خاکشیر به جرات می‌توان اظهار نمود که از دستگاه تریبوایروالکترواستاتیک ساخته شده با تغییرات جزئی برای جدایش و خالص سازی محصولات ریز مثل یونجه و شبدر استفاده نمود.

منابع

Aksa, W., Medles K., Rezug, M., Boukhoulda, M. F., Bilici, M., and L. Dascalescu. 2013. Two Stage Electrostatic Separator for the Recycling of Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Electrostatic* 71(4): 681-688.

Aman, F., Morar, R., Kohnlechner, R., Samuila, A., and L. Dascalescu. 2004. High-voltage electrode position: a key factor of electrostatic separation efficiency. *Journal of IEEE Transactions on Industry Applications* 40(3): 905 – 910.

AOAC (1984): Ofcial Methods of Analysis. Washington, DC, *Association of Ofcial Analytical Chemists Press*.

Bekhradi, R. 2004. The new treatment plant. Press interpreter. *Kashan*. Page 23.

Bendimerad, S. E., Tilmatine, A., Karim-Medles, K., Miloudi, M., Brahami, Y., and L. Dascalescu. 2013. Robustness testing of a free-fall triboelectric separation process for plastic waste recovery. *Journal of Sustainable Engineering* 7(4): 284-292.

Brosnan, T., and D. W. Sun. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision. *Journal of Food Engineering* 61: 3–16.

Chen, Z., Liu, F., Wang, L., Li, Y., Wang, R., and Z. Chen. 2014. Tribocharging properties of wheat bran fragments in air–solid pipe flow. *Food Research International* 62: 262-271.

Cross, J. A., Mumford-van Urk, H., and S.Singh. 1981. Some experiments in powdercharging and its significance to industrial processes. *Journal of Electrostatic* 10: 235-243 .

Dascalescu, L., Fati,O., Dragan, C., Radu, M., Calin, L., and A. Samuila. 2009. Tribo-aero-electrostatic Separation of ABS and ABS-PC from Granular *Waste Electric and Electronic Equipment. France*.

Dodobia, G., Shibayama, A., Miyazaki, T., and T. Fujita. 2001. Electrostatic Separation of the shredded plastic mixture using a tribo-cyclone. *Magnetic and Electrical Separation,* 11(2): 63-92.

Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold N., Wikström, C., and S. Wold. 2000. Design of Experiments. Principles and Applications. *Learnways* AB. Stockholm.

Fattahi, S.H., Abdollahpour, S., Esmaeilzadeh, E., and M. Moghaddam-Vahed. 2014. Presentation and evaluation of an experimental model for winding nozzles in a wind tunnel with the image processing aided. *Journal of Agricultural Machinery Engineering* 4(2): 274-266.

Haji Sharifi, A. 2003. secrets of herbal medicines. Gulshan publications. Tehran. Page 44.

Kawamoto, H., and S. Umezu. 2008. Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field. *Journal of electrostatic* 66(3-4): 220-228.

Kaufman, J. G. 2000. Introduction to Aluminum Alloys and Tempers. ASM International,. ISBN 0-87170-689-X.

Liming, X. and Z. Yanchao. 2010. Automated strawberry grading system based on image processing. *Computers and Electronics in Agriculture* 71: 32–39

Lundahl, E. 2001. Electrostatic Separation of Chaff from Grain. US Patent, us 6225587B1.

Mortezapour, M., Moshiri-Rad, S., and M. Ekhbari. 2015. Investigating the possibility of separating impurities from saffron straw by using an electrostatic separator, *Journal of Agricultural Machinery Engineering* 5(1): 44-51.

Naik, S., Hancock, B., Abramov, Y., Weili, Y, Rowland, M., Huang, Z., and B. Chudhuri. 2016. Quantification of Tribocharging of Pharmaceutical Powders in V-Blenders: Experiments, Multiscale Modeling, and Simulations. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 105: 1467-1477.

Ralston, O. C. 1961. Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids. Elsevier. Amsterdam.

Tilmatine, A., and S. Bendimerad. 2009. Plastic wastes recovery using electrostatic forces. Front. *Electr. Electron. Eng. China* 4(4): 446 – 450.

Trigwell, S. 2003. Correlation between surface structure and tribocharging of powders. Doctoral dissertation, University of Arkansas at Little Rock, USA.

Vaughan, C., and J. Delouche. 1967. Seed Processing and Handling. Missouri Agricultural press. Handbook, Mississippi State University, USA.

Wang, Y., Chung, D., Spillman, C., Eckhoff, S., Rhee, C., and H. Converse. 1994. Evaluation of laboratory grain cleaning and separating equipment-part I. Trans. *ASABE*. 37(2), 507 - 513.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 17, No. 4, Oct- Nov 2021, p. 473-483

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۷، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۰، ص. ۴۸۳-۴۷۳

Separation the Impurities from *Descurainia* Seed using Electrostatic Method in a Fluid Bed (Tribo-airo-electrostatic)

M. Afsharipour[1], H. Samimi Akhijahani[2*], K. Jafari Naeimi[3]

Received: 2019.03.06
Accepted: 2020.02.12

Introduction: The presence of various impurities leads to the problems in storage time, transmission, selling and consumption process of any product. Thus it is necessary to separate the impurities from the product for industrial processing. *Descurainia Sophia* is a tiny grain seed in light brown color with elliptical shape and it grown up in humid climate. Electrostatic method is a proper way for separation and purification of materials which is based on the absorption and diffusion of charged particles in an electrical field with high voltage. An experimental research was carried out for recycling the plastic waste with tribo-electric system. The result of the research on plastic separation of waste materials showed that by increasing the voltage of the system the purification fold increases. The results of the effect of the applied voltage for recycling the plastic particles showed that by increasing the applied voltage in the electrodes the mass and purity of the polycarbonate (PC) increased and the mass and purity of polyamide (PA) decreased. There is a little information about separation and purification of fine grain seeds and this study is about separating of *Descurainia Sophia* seed and the effect of the parameters using regression analysis.

Material and Methods: *Descurainia* seed samples were collected from the farms located in Mahan city of Kerman province, Iran. Tribo-airo-electrostatic system contains of funnel and feeding container, the charger unit, the separating unit, air transmission channels and gathering unit. Charging unit consists of two aluminum electrode connected to a high voltage DC power supply adjustable between 0-100 kV. A blower was used to suspend material and increase the exposure time of particles in the electric field. The gathering is a box with different partitions divided by wooden sheets. Separated particles fall in the gaps based on the amounts of charges, weight and shape. The separating process takes place by considering physical properties. There are two important forces that acts on the falling of the object in electric field; the electric force acts in the horizontal direction, gravitational force acts in the vertical direction. Considering the purity of the separated seeds in the box, only four sections of the box were selected for size and frequency analysis. For obtaining gathered seed impurity, the digital pictures of the gathered samples imported in Matlab6.5 software and were analyzed using Image processing toolbar based on the differences between seed and impurity color. For regression analysis of the parameters voltage in the electrodes, the distance of the electrodes, the angle of the electrode and the mass of the boxes was considered. Laser diffraction method used for determination the size of separated particles and for this purpose FRITSCH Laser Particle Size Analyser -ANALYSETTE 22 NanoTec system was used.

Results and discussion: The results illustrated that the *Descurainia* seed takes negative charge and moves to the positive electrode and impure particles takes positive charge and moves to the negative electrode. The purity calculations of the experiments showed that the average percentage of box No.1 is more than 98%, box No.2 is between 65%-75%, box No.3 is between 30% to 50% and box No.4 is less than 50%. The values of correlation coefficient of the effective parameters for box No.1 was 90% and this means that 90% of the parameters of equation affected on the weight of the box No.1 for about 90%. By increasing the applied voltage and the angle of the electrodes of the separating unit and decreasing the distance of the electrodes, the purity of box increases. The size analysis of *Descurainia* seed showed that the particles with larger dimensions take more negative charge and moves to negative electrode. The results of the study showed that tribo-airo-electrostatic system separated *Descurainia* seed from waste particles properly. By considering the optimum value of separating parameters the purification increased by 98%. According to the results it can be stated that this system can be used for separation and purification of small grains such as alfalfa and clover.

Keywords: Image processing, Tribo-airo-electrostatic, Purification, Correlation coefficient, High voltage.

---

1 and 3. Former MSc Student and Assistance Professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering Shahid bahonar University of Kerman.
2. Assistance Professor, Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan.
(*Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)